技術論文

農業機械学会誌 71(3) : 85～93, 2009

耕うんロボットの適応性と信頼性の向上 (第3報)*

——耕うんロボットによる各種無人作業の実行——

松尾陽介*1†・行本　修*2・山本聡史*2・野口　伸*3・原　令幸*4

要　旨

実用レベルの無人ロータリ耕を行うことができる耕うんロボットについて，第1にその有効な利用方法として，1人のオペレータがロボットに無人作業を行わせながら従来型トラクタの有人運転作業を行う方法を提案した。第2にロータリ耕以外の作業への適用として，ロータリ耕用の作業ソフトをベースに播種作業と代かきを行う作業ソフトを作成した。第1の利用方法を適用したほ場試験の結果，ロボット作業はトラブルなく行われ，オペレータ1人で有人運転作業の約1.8倍の能率で作業を行うことができた。第2の他作業の適用では，麦の播種作業を省力的にかつ高精度で行うことができ，代かきを慣行の有人運転作業と比べ効率的に行うことができた。

[キーワード] 無人作業，慣行作業，作業能率，ロータリ耕，播種，代かき，耕うんロボット

Improvement of Adaptability and Reliability of Tilling Robot (Part 3)*

——Various Unmanned Operation with Tilling Robot——

Yosuke MATSUO*1†, Osamu YUKUMOTO*2, Satoshi YAMAMOTO*2,
Noboru NOGUCHI*3, Yoshiyuki HARA*4

Abstract

Tilling robot can perform unmanned rotary tilling at a practical level. At first, to utilize the robot effectively, we suggested an application in which one operator manually operates the usual tractor while causing the robot to perform unmanned operation. Second, to apply the robot to other work, operation software for "seeding" and "soil puddling" were made based on software for rotary tilling. In a field test of the first application, one operator could perform tilling efficiently, approximately 1.8 times the manual operation. In field tests of the second application, one operator could execute wheat seeding precisely with saving labor. The unmanned soil puddling could be performed more efficiently than by conventional manual operation.

[Keywords] unmanned operation, conventional operation, work efficiency, rotary tilling, seeding, soil puddling, Tilling robot

---

* 1999年4月　第58回農業機械学会年次大会（佐賀大学）にて一部講演

*1 会員，独立行政法人農業・食品産業技術総合研究機構　生物系特定産業技術研究支援センター（〒331-8537 埼玉県さいたま市北区日進町1-40-2　TEL 048-654-7000）
Institute of Agricultural Machinery, Bio-oriented Technology Research Advancement Institution, National Agricultural and Food Research Organization, 1-40-2, Nisshin, Kita-ku, Saitama, 331-8537, Japan
*2 会員，同上
*3 会員，北海道大学大学院農学研究院（〒060-8589 札幌市北区北9条西9丁目　TEL 011-706-3847）
Graduate School of Agriculture, Hokkaido University, Kita 9, Nishi 9, Kita-ku, Sapporo, 060-8589, Japan
*4 会員，北海道立中央農業試験場（〒069-1395 北海道夕張郡長沼町東6線北15号　TEL 0123-89-2001）
Hokkaido Central Agricultural Experiment Station, Higashi 6, Kita 15, Naganuma-cho, Yubari-gun, Hokkaido, 069-1395, Japan
現在：社団法人北海道農業機械工業会（〒060-0002 札幌市中央区北2条西2丁目19-1　TEL 011-251-7743）
Present address : Hokkaido Agricultural Machinery Association, 19-1, Kita 2, Nishi 2, Chuo-ku, Sapporo, 060-0002, Japan
† Corresponding author : ymatsuo@affrc.go.jp

I 緒　言

本研究は，実用レベルの無人ロータリ耕を行うことができる耕うんロボット（以下，ロボットと呼ぶ）について，その無人作業の信頼性向上や安全性確保，ほ場や作業に対する適応性の向上を図ることを目標に行った研究であり，ロボットの位置情報と進行方位情報を取得できる航法システムXNAVを適用したロボット（Matsuo et al., 2001a ; 2001b）を対象に，そのコントローラに組込むプログラム（以下，作業ソフトと呼ぶ）を改良・作成して，ほ場試験によってその効果を実証したものである（Matsuo et al., 2008a ; 2008b）。

本報では，第1にロボットの有効な利用方法として，作業途中に資材補給等で作業者の関与が必要でないロータリ耕において，1人のオペレータがロボットに無人作業を行わせながら従来型トラクタの有人運転作業を行う作業方法を提案し，作業試験を実施したので，その結果を報告する。第2にロータリ耕以外のトラクタ作業への適用として，播種作業を行う「播種ソフト」と代かきを行う「代かきソフト」を作成したので，それらの作業ソフトの構成や特徴，及び作業試験結果を報告する。播種作業ではロボット作業により作業者を減らす省力化を目標とする試験を，代かき作業ではロボット作業により効率的な作業が行えることを確認する試験を行った。

II 2台同時作業法

ロボットによるロータリ耕では，航法システムの設定や作業区画情報の読込み，走行速度段の設定などの初期設定を作業前に行えば，後はロボットのみによる区画全面の無人作業が行われる。一方，第1報で報告したように，ロボットには作業前の自己診断機能，作業中の異常時対応機能が備わっており，ロボット作業の開始，実行が円滑に行われるよう対応を行っている。

しかし，作業区画内のほ場条件の変化が大きい場合は，走行速度段やPTO速度段，耕深を作業の途中で変えざるを得ない場合があり，また，ほ場を柵で囲うといったことが一般的でない農業現場では無人作業中に作業区画内に人が入る場合も想定される。このような状況の検出や各種設定の途中変更などの対応，ロボット作業の再開・継続については異常時対応機能により行われるが，状況に応じた適切な走行速度段の選定・変更などの対応は作業者（オペレータ）の判断，対応に頼る必要がある。

そこで，現状のロボット作業を安全にかつ高い信頼性で実施し，オペレータ1人当たりの作業能率を向上させる作業方法として，オペレータがロボット作業を時々監視しつつ，同じほ場内またはロボット作業を見通せる別のほ場において有人作業を行う作業形態が考えられる。その作業形態の1例として，1人のオペレータがロボットによる無人ロータリ耕を実施，それを時折監視しながら従来型トラクタを有人運転してロータリ耕を行う作業方法「2台同時作業法」を提案し，その作業試験を行った。

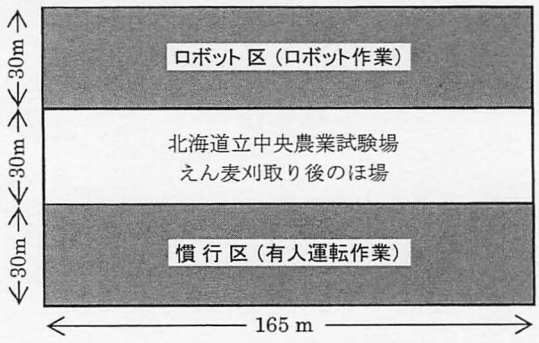

図1　2台同時作業法の作業試験区

Fig. 1　Experimental plots to evaluate the method of one operator making two vehicles operation simultaneously

1. 作業試験の方法

(1) 試験条件

作業試験は，北海道立中央農業試験場のえん麦刈取り後のほ場（土壌：未熟火山性土）内に，約30×165 m（49.3 a）の矩形区画を3区並べて設定し，中央の1区画を空けて1つの区画を有人運転作業を行う試験区（慣行区）とし，もう1つの区画をロボットによる無人作業を行う試験区（ロボット区）とした（図1）。有人運転作業用のトラクタには，ロボットのベーストラクタと同一機種のクボタGL321（24.3 kW）を用い，耕うんロータリも作業幅170 cmの同仕様のものを両試験区の作業に使用した。

前提条件として，対象区画では定常的にロボット作業が行われており，ロボットの航法システムXNAVの基準局装置である自動追尾型測量装置AP-L1（(株)トプコン製）は区画外の適当な場所に常設されていると仮定し，その起動と設定のみを毎回のロボット作業の前に行うこととした。また，作業区画情報を取得するティーチングは対象作業区画において1回実施すれば良く，そのティーチングは実施済みであり，作業前にコントローラから作業区画情報を読込めば良いこととした。この航法システムとティーチングに関する前提条件は，下記の麦播種作業試験と代かき作業試験も同様とした。

作業の方法は，両試験区とも標準的なロータリ耕作業法，つまり，区画の内側を隣接往復作業により，外周枕地は3周の周り作業により処理する方法とし，ロボットの作業ソフトは標準作業ソフト（Matsuo et al., 2001a）を用いた。オペレータはトラクタ作業に慣れた同試験場の職員とし，作業速度はほ場の状態から両試験区とも約0.5 m/s（速度段H-1速），耕深は12〜13 cmを目標にトラクタの自動耕深制御機能を使用して作業を行った。目標の耕深を得るための作業部の設定は，オペレータが事前の確認・調整を行って決定したが，下記(2)の手順（ii）

図 2　2台同時作業法の作業試験
Fig. 2　Field test to evaluate the method of one operator making two vehicles operation simultaneously

において，区画内の適当な場所で調整作業を行って確認・設定することもできる。

(2)　作業の手順

上記条件の下，オペレータが行う作業等の手順は以下のとおりとした。

（ｉ）　2台同時作業法の開始として，作業区画外に設置済みの AP-L1 を起動し，その初期設定を行う。

（ii）　作業区画のそばにあるロボットをロボット作業区画内に手動運転で移動する。作業区画内の停止位置はほ場の入り口付近の適当な位置で良く，下記（iii）の無人作業開始後，ロボットは自己位置を認識して予定の作業起点まで適切な経路上を空走して行く。

（iii）　ロボットの初期設定として，作業区画情報の読込みや速度段の設定，作業ソフトによる自己診断を行った後，無人作業を開始する。

（iv）　作業区画のそばにある従来型トラクタを慣行区内に移動し，有人運転作業を開始する。

（v）　オペレータは有人運転作業を行いつつ無人作業の状況を時々監視し，トラブルなどがあれば対応する。また，ロボットの区画外への暴走などの非常事態に備え，リモコン非常停止装置を携帯して作業を行う。

（vi）　有人運転作業が終了したら，トラクタを慣行区外に移動するとともに，無人作業が終了した段階でロボットの終了処理を行い，ロボットを区画外に移動させて2台同時作業法の終了とする。無人作業が先に終了した場合も，最後にロボットを区画外に移動させて全作業の終了とする。

(3)　作業試験での調査・評価項目

両試験区の作業とも，作業手順の所要時間を測定，調査して作業能率を評価し，作業の軌跡等を測量，調査して直進性や残耕面積などの作業精度を評価した。また，航法システムを含むロボットの取扱い性についての評価も行った。下記の麦播種作業試験も含め，作業能率や作業精度の評価における指標の算出法などについては既報

表 1　2台同時作業法の作業試験結果
Table 1　Test results of the method of one operator making two vehicles operation simultaneously

項　目	総　合	慣行区	ロボット区
耕うん可能面積（a）	98.6	49.3	49.3
実耕うん面積（a）	98.1	49.0	49.1
総時間（min）	127.6	—	—
初期設定時間（min）	2.9	—	2.9
無人作業時間（min）	123.9	—	123.9
有人作業時間（min）	115.5	115.5	—
撤去時間（min）	0.8	—	0.8
機械能率（min/10 a）	24.4	23.6	25.2
作業者能率（min/10 a）	13.0	23.6	0.8
残耕面積（a）	0.04	0.04	0.00
総踏付け距離（m）※1	96.4	49.3	47.1
直進性（m）※2	—	0.11	0.04
直進の平行度（°）※3	—	0.09	0.01

※1：旋回時などに車輪が既作業域に踏み込んだ距離の総和
※2：長辺方向の直進作業時軌跡の目標経路に対する進行横方向偏差の標準偏差（平均）
※3：同上軌跡の1次回帰直線の目標経路に対する傾き（絶対値の平均）

（Matsuo et al., 2001b）の方法を用いた。

2. 作業試験の結果と評価

作業試験の様子を図2に，主な作業能率，作業精度に関する試験結果を表1に示す。

(1)　作業状況と作業能率

両試験区とも，前記 1.(2)の手順（ｉ）～（vi）をトラブルなく遂行することができ，目標の耕深 12～13 cm を維持したロータリ耕を区画全面に対し行うことができた。

慣行区の有人運転作業では，隣接往復作業や周り作業はロボット区の無人作業と同じ速度段 H-1 速により行われたが，空走や旋回は速度段を適宜変更して行われたため，全作業時間はロボット区より短く，慣行区の機械能率はロボット区をやや上回る結果となった。表1から，慣行の有人運転作業の作業者能率 23.6 min/10 a に対し，2台同時作業法では，総合の作業総時間を実耕うん面積で除した 13.0 min/10 a が作業者能率となり，その比は 1.82 となる。この結果から，ロボットを利用した2台同時作業法により，オペレータ1人で慣行作業の約 1.8 倍の能率で作業が行えることが確認された。

(2)　作業精度

表1の作業精度に関する結果から，作業が行われなかった残耕面積は慣行区で 0.04 a あったが，ロボット区ではゼロであった。旋回時などに既作業域に侵入した結果である総踏み付け距離は，慣行区とロボット区に大きな差はなかった。直進性や直進の平行度は明らかにロボット作業が慣行作業を上回る結果となった。

(3)　取扱い性と総合評価

航法システムを含むロボットの取扱い性については，取扱説明書を用意し，また1時間程度の練習を行ったこ

ともあり，「取扱いが難しい」といった評価はオペレータから聞かれなかった。ロボット作業が円滑に実施され，トラブルなく終了したことは，作業前の自己診断機能によるところが大きく，その機能を有することがロボットの取扱い性に問題がないと評価できる一因と考えられた。

上記のとおり，ロボット作業がトラブルなく行われれば，2台同時作業法によりオペレータ1人で従来型トラクタによる慣行作業の約1.8倍の能率で作業が行えることを確認した。このことから，総合的に見て2台同時作業法はロボットを有効かつ安全に活用する作業法と評価できた。

ただしロボット作業にトラブルがあった場合は，有人作業も一時中断する必要があり作業能率が低くなるので，作業前の初期設定を適切に行うとともに，作業状況の確認を作業前に行うことも必要である。なお，これまでに行ったロボット作業において，異常時対応機能が働きオペレータが対応を行ったトラブルの発生割合は5%以下（10a区画以上の全面作業680回中に30回発生）であり，作業前の初期設定を適切に行えば，ロボット作業がトラブルなく継続・完了する割合は高いと判断された。

今回行った作業能率の試験，評価では，ロボットの作業ほ場までの移動時間や作業状況の確認・調整時間は含めなかった。その理由は，これらの時間が従来の有人・慣行作業でも必要な時間であり，これらの時間がロボット作業と有人作業の並行実施によっても増えないことを前提条件としたためである。その前提条件は，ロボットの作業ほ場までの移動は有人運転の従来型トラクタにロボットが自動追従して移動することにより，また従来型トラクタは作業機も含めてロボットと同型式のものとして，作業状況の確認・調整はロボットまたは従来型トラクタにより1回行えば良いことによって実現される。

III 麦播種作業

大区画ほ場の小麦の施肥・播種作業（以下，播種作業）は通常2人で作業が行われ，1人は主にオペレータとして播種機を装着したトラクタの運転を行い，もう1人は補助者として肥料と種子を積載した運搬車を運転・移動しながら，適宜，播種機に種子と肥料を補給する作業を行う。この通常2人で行われる大区画ほ場の播種作業にロボットを適用，1人作業で行う省力化を目標に，ロボットにより播種作業を行う作業ソフト「播種ソフト」を作成して，作業試験を行った。

1. 播種ソフト

大区画ほ場での小麦播種作業は長辺方向の隣接往復作業のみで行うことが多く，播種ソフトはロータリ耕用の標準作業ソフトの隣接往復作業を行う部分をベースに構成した。往復作業の行程間隔（作業ピッチ）は播種機の作業幅270cm（畦間30cm×9畦）であり，ロータリ耕の作業ピッチ160cm（＝作業幅170cm－作業重複幅10cm）より大きいため，行程端での旋回ではトラクタの片ブレーキ及び「倍速ターン」の機能を効かせない設定とした。旋回時の舵角は，旋回半径が作業幅の半分135cm程度となる舵角を事前に調査・確認し，同舵角を旋回時に与えることとした。

作業試験ほ場の長辺が286mで，播種機のホッパ容量と施肥・播種量から概ね2往復に1回，肥料と種子の補給を行う必要があることから，2往復に1回，ほ場端で停止するように播種ソフトを作成した。種子等の補給を行いながら隣接往復作業を行う手順と，播種ソフトの流れ（[ ]内）は以下のとおりである。

（i） 種子等の補給を行う側のほ場端にロボットを手動運転で移動し，ロボットの初期設定を行う。
[播種ソフトの起動→作業区画情報の読込み等初期設定]

（ii） 播種機（下げ位置）のホッパに種子・肥料を入れ，作業を開始する。
[作業開始キー入力待ち→キー入力検出→播種機上げ→シャトル変速：前進]

（iii） 播種開始位置まで前進移動後，播種作業を開始し，行程の作業終了位置で作業停止，180度旋回する。
[開始位置で播種機下げ→スロットル上げ→終了位置で播種機上げ，スロットル下げ→旋回のための操舵→180度旋回後操舵戻し]

（iv） 上記（iii）を2往復分繰り返し。

（v） 2往復後に180度旋回，肥料・種子の補給位置まで後進移動し停止して，（ii）へ。
[旋回後，シャトル変速：停止→後進→停止→播種機下げ]

（vi） （ii）～（v）を，作業予定区画の作業が終了するまで繰返す。

2. 播種作業試験の方法

ロボットによる播種作業試験は北海道河西郡芽室町の農家ほ場（土壌：乾性火山性土）で行うこととし，播種機は田端農機具製作所製のTW-7（トラクタ直装式，7畦用）を9畦用に改造したものを用いた。同播種機はロボットのベーストラクタ（24.3kW）に装備，作業するには重量バランスが適当でないが，作業速度を低めに設定して試験を行った。

試験は286×65mの矩形区画で行い，上述のとおり，2往復に1回，種子等の補給を行う長辺方向の隣接往復作業を実施した。作業者については，種子等の補給は慣行作業と同じように行いたいという農家の要望によりオペレータと補助者の2名を配置し，オペレータはロボットの取扱いと作業の監視及び補給作業を，補助者は補給作業と補給時の種子等を積載した運搬車の運転・移動を行うこととした。このため，ロボット作業により1人作業を可能とする省力化の検証については，作業状況を観察して評価した。また，ロボット区の他に慣行区を設け，慣行区ではロボットを有人運転して播種作業を行うこととし，その区画は286×22mとした。

ロボット区，慣行区とも，播種作業や種子等の補給の

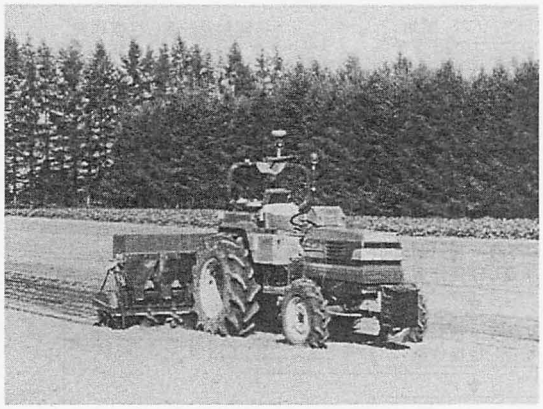

図 3　ロボットによる播種作業試験
Fig. 3　Field test of robot wheat seeding

所要時間を測定して作業能率を調査するとともに，作業の軌跡を測量，調査して直進性や直進の平行度などの作業精度を評価した。また，上記の2台同時作業法の試験と同様に，航法システムを含むロボットの取扱い性についての評価も行った。

3. 作業試験の結果と評価

ロボット作業の様子を図3に，作業能率や作業精度の測定結果を表2に示す。

(1)　作業状況と作業能率

ロボットによる播種作業はトラブルもなく順調に行うことができた。

作業速度とほ場作業量はロボット区が 0.86 m/s，0.68 ha/h であったのに対し，慣行区が 1.17 m/s，0.86 ha/h であった。これはロボット作業における設定作業速度が低かったためであり，ロボット作業では作業前の設定速度段（H-3速）を作業終了まで変えなかったのに対し，慣行作業では作業負荷に応じて速度段を途中から H-4 速に上げたことによる。

播種と種子等の補給に要した時間の内訳を見ると，作業速度が高かった慣行区で播種の割合が小さくなったが，作業速度が同じと仮定した場合の補給に要する時間割合はロボット区と慣行区でほぼ同じであった。

総作業時間で見た作業者1人当たりの能率（作業者能率1）はロボット区が 2.94 h/ha，慣行区が 2.31 h/ha となり，作業速度が高かった分，慣行区の方が能率が高い結果となった。一方，作業に拘束された時間に基づき作業者1人当たりの能率（作業者能率2）を試算すると，ロボット区では2人の作業者が補給のみに拘束されたと見ることができ，その能率は 0.34 h/ha，慣行作業では1人が全作業に拘束され，1人が補給に拘束されたと考えられ，その能率は 1.32 h/ha となった。さらに，作業の観察から，ロボット区における補給はオペレータ1人でも十分に行えると考えられ，補給に要する時間が増えたとしても，省力的な播種作業が行えると考察された。

(2)　作業精度

表 2　播種作業試験の結果
Table 2　Test results of wheat seeding

項　目		慣行区	ロボット区
作業面積（ha）		0.62	1.85
平均作業速度（m/s）		1.17	0.86
作業時間（min）		43.0	163.1
ほ場作業量（ha/h）		0.86	0.68
作業時間割合（%）	播　種	76.2	82.0
	補　給	14.5	11.5
	移動・旋回	9.3	6.5
作業者能率1（h/ha）※1		2.32	2.94
作業者能率2（h/ha）※2		1.32	0.34
直進性（m）※3		0.08	0.05
直進の平行度（°）※4		0.02	0.01
播種行程隣接条間	平　均（cm）	31.5	31.8
	標準偏差（cm）	6.5	8.2

※1：総作業時間で見た作業者1人当たりの能率
※2：作業に拘束された時間で見た作業者1人当たりの能率
※3，※4：表1の下注　参照

表2の試験結果から，作業時の直進性はロボット区が5cm，慣行区が8cmであり，ロボット区では目標直進経路からの横方向偏差がほぼ5cm以下の高精度作業が行われた。各行程の播種作業跡の平行度（直進の平行度）についてもロボット区の方が良い結果となった。

各行程の隣接条間については，目標の 30 cm に対しロボット区が平均 31.8 cm，慣行区が平均 31.5 cm であり，ロボット区と慣行区はほぼ同等であった。隣接条間の標準偏差はロボット区の方が大きい結果となった。この結果は，行程端の枕地を小さめに設定したことにより 180° 旋回後の前進・幅寄せ距離が短くなり，次行程の作業開始位置までに予定経路に乗る幅寄せが完了しなかったことによると考えられた。

ロボット区での播種開始位置と終了位置について，進行方向に 0.5 m 程度のズレが生じた行程があった。この結果は，ロボットのベーストラクタの能力に対して播種機が大き過ぎたため，重量が変わる播種機の昇降を安定して行えなかったことによると考えられた。

(3)　取扱い性と総合評価

航法システムを含むロボットの取扱い性については，上記Ⅱの2台同時作業法の試験結果と同様，「取扱いが難しい」といった評価は聞かれなかった。

播種作業では種子や肥料の補給を適宜行う必要があり，ロボットを用いても完全無人で作業を完了することはできないが，ロボットの適用により慣行の2人作業を1人作業で行うことが可能である。また，その1人作業も，長時間の隣接条間を維持する運転操作の負担から解放され，時折監視を行いつつ必要な時に補給を行えば良いことから，ロボットによる播種作業は省力化と軽労化が達成される活用方法と考えられる。

ロボットによる播種作業において改良が必要な点とし

ては，行程端での180°旋回後の前進・幅寄せを短い距離で行えるようにすることが必要と考えられ，その対応として，過去の旋回後の幅寄せ必要量を学習して旋回時の舵角を調整する機能を持たせることなどが考えられる。また，播種作業に限らず，広いほ場での作業では目視による作業状況の監視は300 m程度までが限界であり，作業状況を遠隔モニタできる方法を検討することが必要と考えられた。さらに，その遠隔モニタによりトラブル発生時の状況が確認でき，ロボットの作業設定等の変更を遠隔で行える機能を持たせれば，ロボット作業をより有効かつ省力的に活用できるようになると考えられる。

IV　代かき作業

水田の代かき作業（以下，代かき）は，トラクタに代かきロータリを装着して，ロータリ耕と同様に往復作業と外周の周り作業を組み合わせて行う方法などにより行われる。ロータリ耕との違いは，往復作業や周り作業における行程端での旋回時も作業機を上げずに作業を行う場合が多く，その旋回は大きめに緩やかに行って，ほ場面を荒らさないよう，また土寄せが少ないように作業が行われることである。また，一面の作業を1回だけでなく作業方向を変えて繰り返し，念入りに撹拌と均平を行うことも代かきの特徴である。

ロボットにより代かきを行うために，第1報の標準作業ソフトをベースに，その往復作業や周り作業における旋回部分の変更や作業方向を変えての繰り返し作業などを行う等の改良を加えて「代かきソフト」を作成し，そのソフトを用いての作業試験を行った。

1.　代かきソフト

(1)　往復作業

標準作業法における往復作業は隣接行程作業として行っているが，代かきソフトによる往復作業は，区画の一端から2行程分を空けて往復作業を開始し，行程端の180°旋回を大きめに行って，旋回後の直進作業は前作業行程から1行程空けて行うようにした。その1行程おき往復作業を区画の一端から反対側に向けて繰り返して行き，区画の反対側端に近づいたら（端まで2行程分を残す程度になったら），折返して空けた行程を作業して行く「1行程おき折返し往復作業」を行うようにした（図4）。

各行程端での180°旋回は，まず，代かきロータの作業幅分より若干小さめの旋回半径（R_0）が得られる舵角（θ_0）で90°旋回を行い，次の1行程分空けた作業経路からR_0の距離分手前まで直進した後に，再び上記舵角θ_0で90°旋回を行って，180°旋回がなされるようにした。なお，折返しの際の行程端での旋回は舵角を大きめにして連続的に180°旋回し，隣接作業ができるようにした。

この往復作業は，直進作業を区画の長辺方向に行うものと，短辺方向に行うものを設定し，作業の繰り返しにおいて，それらを交互に行うこととした。この往復作業の方向を変えて代かきを行う方法は一般に「縦横法」と呼ばれている。

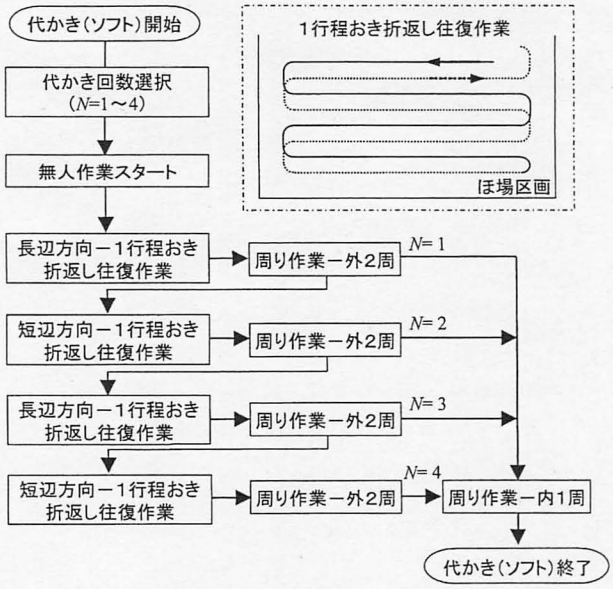

図4　代かきにおける往復作業方法と代かきソフトの流れ
Fig. 4　Returning operation method of robot soil paddling and the flow of operation software for soil paddling

(2)　周り作業

代かきソフトによる周り作業は，上記の往復作業が終わった後に，区画の最外周を1周，続いてその内側を1周する周り作業1（外2周）と，さらにその内側を1周する周り作業2（内1周）を設定し，代かき回数の設定により，その履行の流れを図4のように設定した。

周り作業における角部での90°旋回は，上記往復作業における180°旋回の初めの90°旋回と同じとし，作業機は上げずに作業を行いながらの旋回とした。旋回後は，続けて前進の直進作業行程に移行する。

(3)　代かき回数の選択と各作業の履行

作業回数については，最大4回まで一面の作業を繰り返すことを選択できるようにした。図4のように，1回がけで終わる場合は長辺方向の往復作業を行った後，外2周の周り作業と内1周の周り作業を行って作業を終了する。2回がけの場合は，1回がけの往復作業，外2週の周り作業の後，短辺方向の往復作業を行い，外2周の周り作業と内1周の周り作業を行う。3回がけでは，2回がけの後，再び長辺方向の往復作業と周り作業を，4回がけでは，3回がけの後，再び短辺方向の往復作業と周り作業を行う。

2.　作業試験と結果

(1)　作業試験の方法

作業試験は生研センター附属農場の水田（土壌：細粒質グライ化灰色低地土）で行い，代かきソフトを用いたロボット作業（ロボット区）と農場職員がロボットを有人運転して行う慣行作業（慣行区）を実施して比較を

図 5　ロボットによる代かき作業試験
Fig. 5　Field test of robot soil paddling

表 3　代かき作業試験の結果
Table 3　Test results of soil paddling

項　目		ロボット区	慣行Ⅰ区	慣行Ⅱ区
作業面積 (a) (m)		30 50×60	50 50×100	30 50×60
作業方法		縦横法	縦横法	順次法
平均作業速度（m/s）		0.70	0.82	0.78
残耕面積（a）		0.43	0.90	0.55
ほ場作業量（ha/h）		0.22	0.28	0.14
ほ場表面の高低差	最大（cm）	14.0	—	10.0
	標準偏差（cm）	2.7	—	1.8

行った。代かき作業機には作業幅 2.3 m の代かきロータリを用い，ロボット区は 30 a（50×60 m）の区画で，上記の代かきソフトによる作業を 2 回がけ（縦横法 2 回がけ）の設定で行った。慣行区は慣行Ⅰ区：50 a（50×100 m）と慣行Ⅱ区：30 a（50×60 m）を設け，慣行Ⅰ区では代かきソフトによる作業と同じ縦横法 2 回がけを行った。慣行Ⅱ区では，慣行作業でよく行われる「順次法」と呼ばれる作業法を 2 回がけして代かきを行った。順次法は，2〜数行程分を空けた往復作業を，行程端の 180° 旋回を行いながら 1 行程ずつ横にシフトして行くもので，コイル状の経路を取りながら塗りつぶすように代かきを行っていく作業法である。

作業速度については，ロボット区では 0.7 m/s 程度になるよう，速度段を H-2 速に設定した。慣行区の作業速度は基本的に任意としたが，ある程度低めに設定したロボット区と同じ H-2 速あるいは，H-3 速で行うようにオペレータに指示した。作業機の高さ（耕深）については，ロボットが作業中に作業機の下げ位置を変更できないため，ロボット区とともに慣行Ⅰ区は作業機の下げ位置一定で作業を行ったのに対し，慣行Ⅱ区では作業機の下げ位置はオペレータが任意に上げ下げすることとした。慣行Ⅰ区では，ロボット区と作業方法も同様にし，ロボット作業との作業能率や作業状況の比較を目標として作業条件などを設定した。慣行Ⅱ区では，オペレータの任意な作業設定ができる等代かきの仕上がりにも留意した作業を目標にした。なお，すべての試験区で，ベーストラクタの機能である自動耕深制御を作動させる設定とした。

試験での測定項目は，作業時間や作業速度，残耕面積，場所毎の作業回数，および作業後のほ場表面の均平状況とした。それらの測定方法として，作業速度や残耕面積，場所毎の作業回数は，ロボット区では航法システム XNAV の AP-L1 の位置出力を記録・解析して求め，慣行区も手動運転のロボット（トラクタ）の動きを同様に計測・記録して求めた。作業後の均平状況は，AP-L1 の位置検出対象である光反射プリズムを人が持ってほ場内を歩き回り，ほ場表面のプロフィールをロボット区と慣行Ⅱ区の各区内 100 点の高さを含む 3 次元位置データを計測して求めた。

(2)　試験結果-作業能率

ロボット作業の様子を図 5 に，主な試験結果を表 3，図 6，図 7 に示す。

ロボットによる代かきはトラブルもなく順調に行うことができた。

作業速度は，ロボット区が平均 0.70 m/s であったのに対し，慣行Ⅰ区が平均 0.82 m/s，慣行Ⅱ区が平均 0.78 m/s であり，オペレータが状況に応じて作業速度を調整した慣行区がやや高い結果となった。ほ場作業量は，ロボット区と慣行Ⅰ区が同様の作業方法を用いたため作業速度に応じた結果となったが，慣行Ⅱ区ではかなり作業の重複が多くなり，ほ場作業量は低くなった。

(3)　試験結果-作業精度

1 回も作業機が通らなかった残耕面積はロボット区が最も少なく，慣行Ⅰ区とⅡ区では，単位面積当たりではほぼ同程度の残耕があった。

図 6 の結果から，場所毎の作業回数（作業重複度）については，ロボット区の往復作業の領域ではほぼ目標の 2 回がけが行われていた。慣行Ⅰ区は 1 回がけの領域が比較的多かった。慣行Ⅱ区は，目標より多い 3 回がけ以上の重複領域が多く，またそのばらつきも多かった。この結果から，作業の重複度については，ロボット区が目標の 2 回がけを効率良く行えており，無駄のない作業が行えることが分かった。代かきでは，作業を行った領域やその回数を目視で見分けることは難しく，さらに行程を空けて作業することが多いため，目視に頼る有人の慣行作業では効率の良い作業が難しいことを示している。一方，ロボット作業は，設定した作業経路で忠実に作業ができるので，代かきを効率的に行うことができる。

代かきの大きな目的であるほ場面の均平状況については，慣行Ⅱ区ではオペレータがほ場面の高低差に配慮して作業速度と耕深を調整したことにより，比較的高低差が少ない仕上がりとなった。しかし，ロボット区では，自動耕深制御機能は使用したが，作業速度と作業機の下げ位置設定が一定であったため，高低差がある程度残る

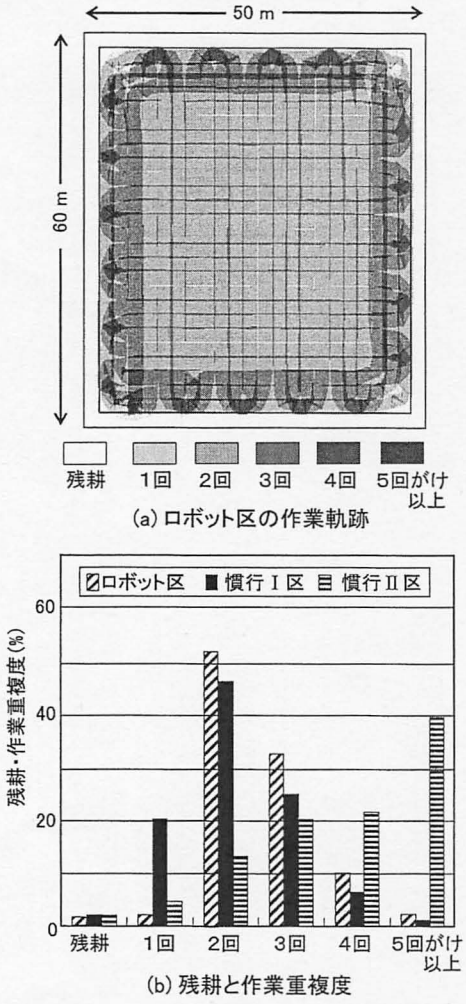

図 6　ロボット作業の作業軌跡と作業重複度
Fig. 6　Work trace of robot soil paddling and the ratio of overlap area

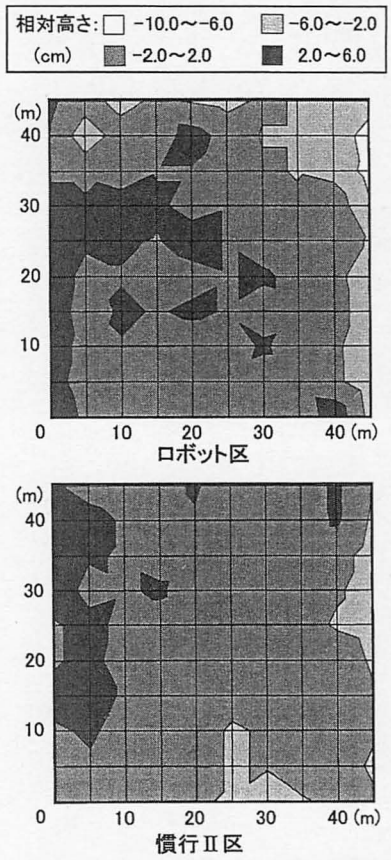

図 7　代かき後のほ場表面の相対高さ等高線図
Fig. 7　Relative contour map of the field surface after soil paddling

結果となった（表3，図7）。

(4)　総合評価と課題

上記の試験結果から，ロボットによる代かきは設定した作業経路で忠実に作業が行えるので，無駄のない効率的な作業を行うことができることが分かった。一方で，代かきの仕上がり精度を確保するためには，ほ場の高低差に応じて，また，直進作業時と旋回作業時によって作業速度や耕深を調節する機能を持たせることや，有人運転作業と組み合わせた適切な作業方法を検討する必要があると考えられた。

V　摘　　要

航法システム XNAV を用いた耕うんロボットについて，第1にその有効な利用方法として，1人のオペレータがロボットに無人作業を行わせながら従来型トラクタの有人運転作業を行う2台同時作業法を提案し，作業試験を行った。第2に，ロータリ耕以外の作業として麦播種作業と代かき作業をロボットにより行う方法について，それらの無人作業を行う作業ソフトを作成し，作業試験を行った。

1）2台同時作業法によりロータリ耕を行った結果，1人のオペレータでロボット作業と有人運転作業を同時に行うことが可能で，直進性などの作業精度はロボット作業が有人運転作業より優れていた。

2）2台同時作業法により，ロボット作業がトラブルなく行われれば，従来型トラクタによる有人運転作業の約1.8倍の能率でロータリ耕を行うことができ，同作業法はロボットの有効かつ安全な活用法であると評価できた。

3）標準作業ソフトをベースに「播種ソフト」を作成し，農家ほ場で作業試験を行った結果，ロボット作業と肥料や種子の補給を1人で行う播種作業を高精度で行えることを確認した。ロボットによる播種作業は，省力化と軽労化を達成できるロボットの活用法であると評価できた。

4）標準作業ソフトをベースに，作業方向を変えての繰り返し作業を任意に選択・設定できる「代かきソフト」を作成した。作業試験の結果，ロボットによる代かきは効率的で無駄のない経路で行えることを確認できた。しかし，代かきの仕上がり精度を高めるためには，作業速度や耕深を適宜調節する機能が必要であると考えられた。

5）これらの作業試験において，航法システムを含むロ

ボットの取扱い性については特に問題はなく，ロボット作業は円滑にトラブルなく行われた。

References

Matsuo, Y., Yukumoto, O., Irie, Y., Ichisugi, N., Noguchi, N., 2001a. Navigation system and work performance of Tilling Robot (Part1). Journal of JSAM, 63 (3), 114-121.

Matsuo, Y., Yukumoto, O., Irie, Y., Ichisugi, N., Terao, H., Haga, Y., 2001b. Navigation system and work performance of Tilling Robot (Part2). Journal of JSAM, 63(3), 122-129.

Matsuo, Y., Yukumoto, O., Noguchi, N., Hamada, Y., 2008. Improvement of adaptability and reliability of Tilling Robot (Part 1). Journal of JSAM, 70 (2), 104-112.

Matsuo, Y., Yukumoto, O., Noguchi, N., 2008. Improvement of adaptability and reliability of Tilling Robot (Part 2). Journal of JSAM, 70 (3), 82-88.

（原稿受理：2008年3月21日・質問期限：2009年7月31日）

コ　メ　ン　ト

[閲読者のコメント]

2台同時作業法をはじめとした複数台同時作業の研究展開に関して，

(1) 耕うんロボット以外への今後の適用可能性

(2) オペレータの身体的疲労等

に対する著者の見解をお聞かせ下さい。

[コメントに対する著者の見解]

(1) 耕うんロボット以外では，管理作業ロボットと慣行管理作業車により機械除草作業を同時に行う方法が有効と考えられます。また，耕うんロボットが代かきを，田植えロボットが田植えを行っている間に，田植え苗の運搬・供給とロボット作業の監視をオペレータが行う異種ロボット作業＋有人補助作業のパターンなども，効果的なロボットの運用・活用方法と考えられます。

(2) 同時作業においては，ロボット作業にあまり気を遣うことなく，またトラブル対応をできるだけ行うことなく有人作業が行えることが重要です。ですから，ロボットの障害物やトラブルの自動検出・対応機能が充実していること，またロボット作業の設定が適正に行われていることが，オペレータが同時作業を楽に安心して行うために必要なことと考えます。